

Štiepenie jadier

2-FJF-115 Fyzika
atómového jadra



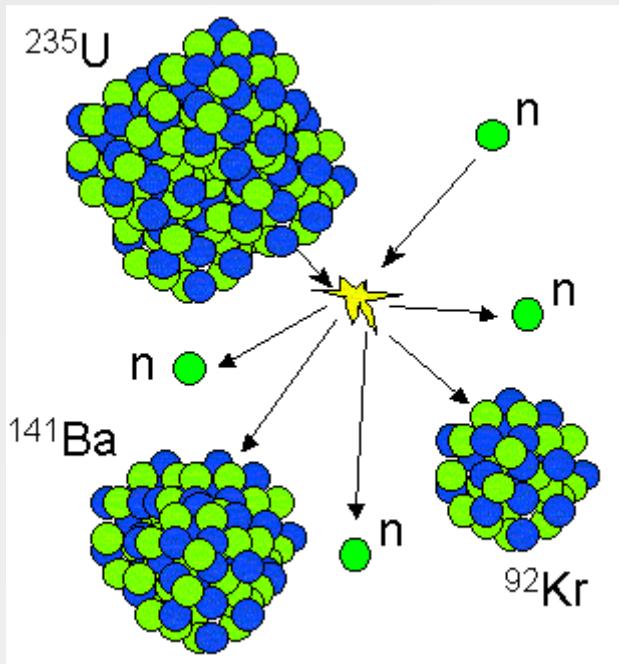


SPONTÁNNE ŠTIEPENIE JADIER

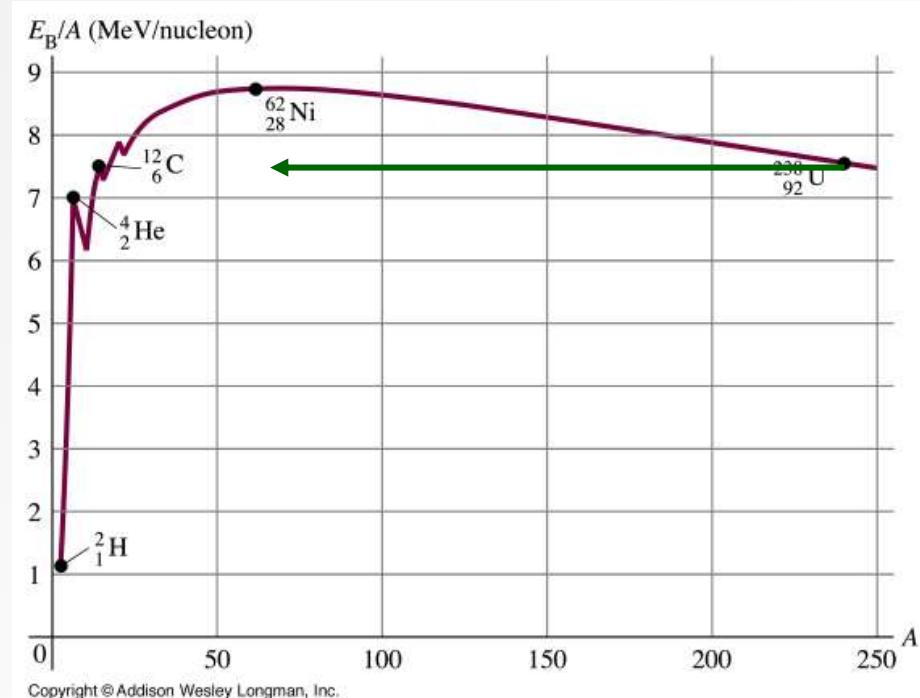
10.10.2018

Stanislav Štípáčik stipacik@fmph.uniba.sk

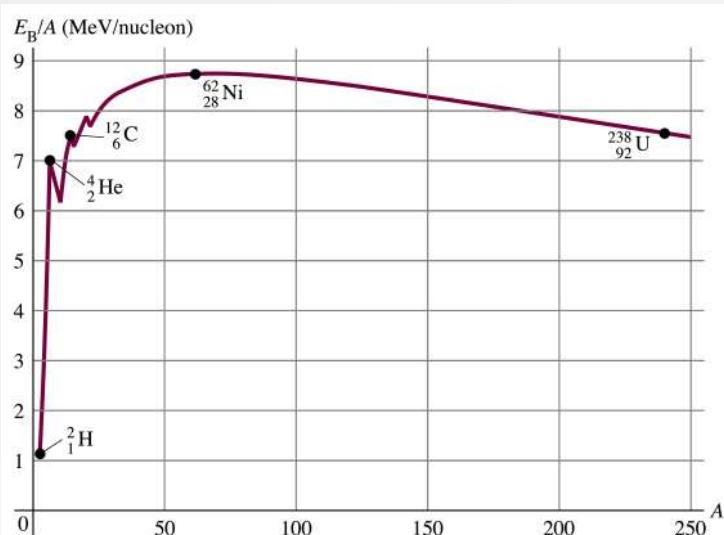
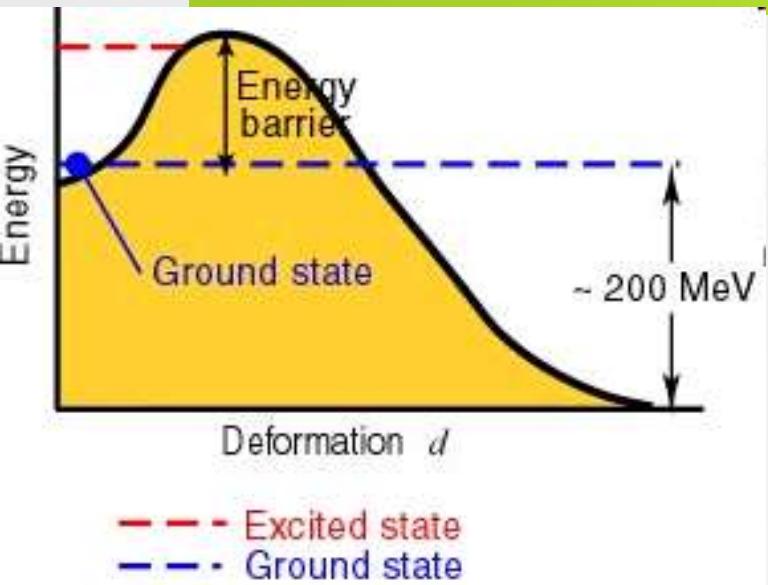
Štiepenie jadier



Rozpad na dva príp. tri fragmenty



Štiepna bariéra



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

20.10.2018

Štepenie jadra

antašo@fmph.uniba.sk

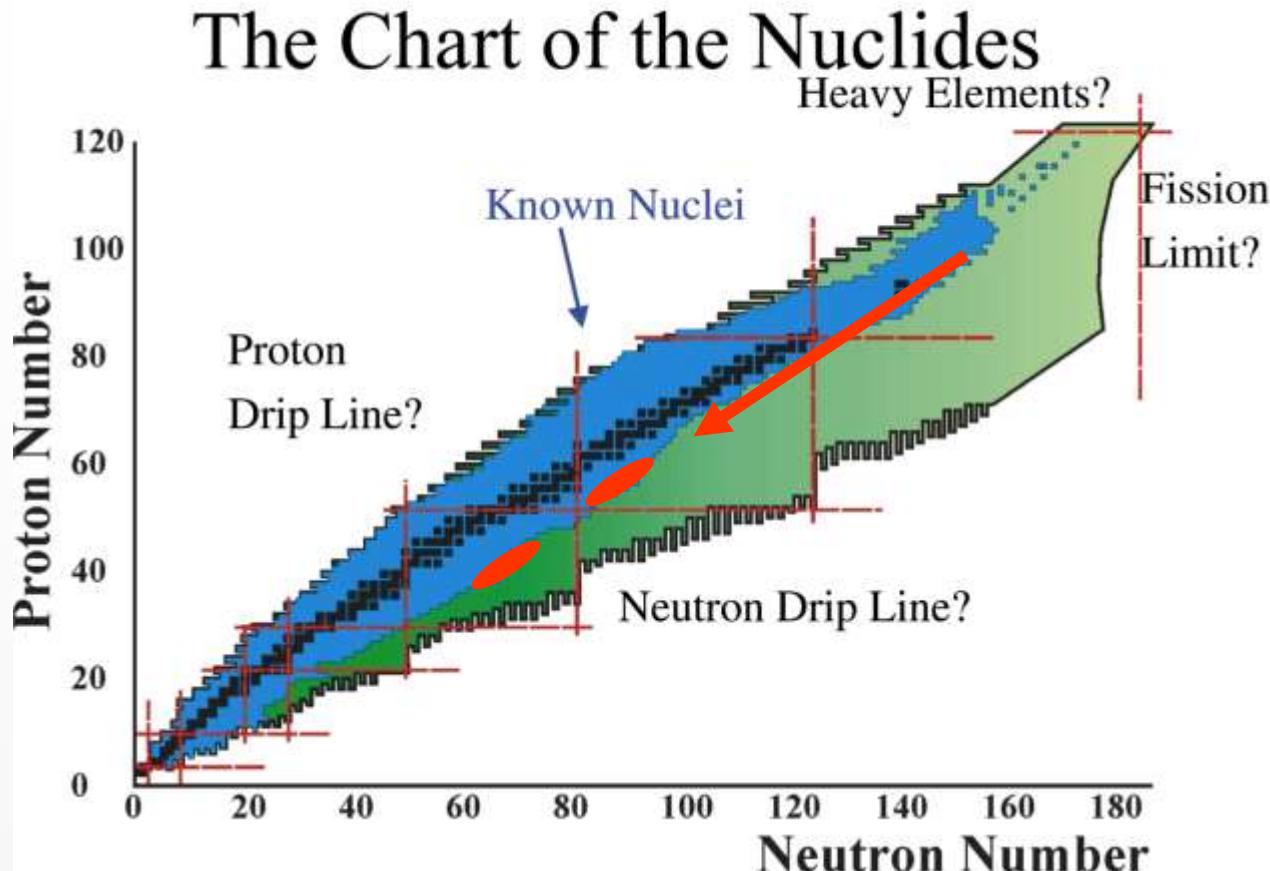
4/23

Rozštiepeniu jadra bráni štiepna bariéra.

Štiepenie môže prebehnúť:

1. dodaním aktivačnej energie (indukované štiepenie).
2. tunelovým efektom.
3. Rozpadom na vzbudený stav.

Štiepenie jadier



Produkujú sa neutrónovo bohaté jadrá exotické jadrá

Problém rádioaktivity jadrového odpadu. Produktom su beta nestabilné izotopy.

Možnosť využitia štiepnych zdrojov na vytvorenie rádioaktívnych zväzkov.

SOME HISTORICAL MILESTONES IN FISSION

<http://www.chem.elte.hu/Sandor.Nagy/loadable/6-104-00.Appendix1.htm>



1932 Discovery of neutron (J. Chadwick)

1937 Development of the Liquid Drop Model (N.Bohr)

1939 Neutron-induced fission (O. Hahn and F. Strassmann)

Explanation of fission (L. Meitner and O.R. Frisch)

1940 Spontaneous fission (^{238}U ,G.N. Flerov and K.A. Petrzhak)

1942 First self-sustaining chain reaction (E. Fermi)

1945 First nuclear bomb (The Manhattan project)

1946 Alpha accompanied (ternary) fission

1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)

1966 Delayed fission (V.I Kuznetzov et al.)

1967 Macroscopic-microscopic method (V. Strutinsky)

1984 Discovery of ^{14}C cluster decay (H.J. Rose and G.A.Jones)

~1994 Electromagnetic fission of radioactive ion beams (GSI)



Objav spontánneho štiepenia

Spontaneous Fission of Uranium

With 15 plates ionization chambers adjusted for detection of uranium fission products we observed 6 pulses per hour which we ascribe to spontaneous fission of uranium. A series of control experiments seem to exclude other possible explanations. Energy of pulses and absorption properties coincide with fission products of uranium bombarded by neutrons. No pulses were found with UX and Th. Mean lifetime of uranium follows ten to sixteen or seventeen years.

FLEROV
PETRJAK

Physico Technical Institute (F),
Radium Institute (P),
Leningrad, U. S. S. R.,
June 14, 1940 (by cable).

G.N. Flerov and K.A. Peterjak Phys. Rev. 58, 89 (1940)

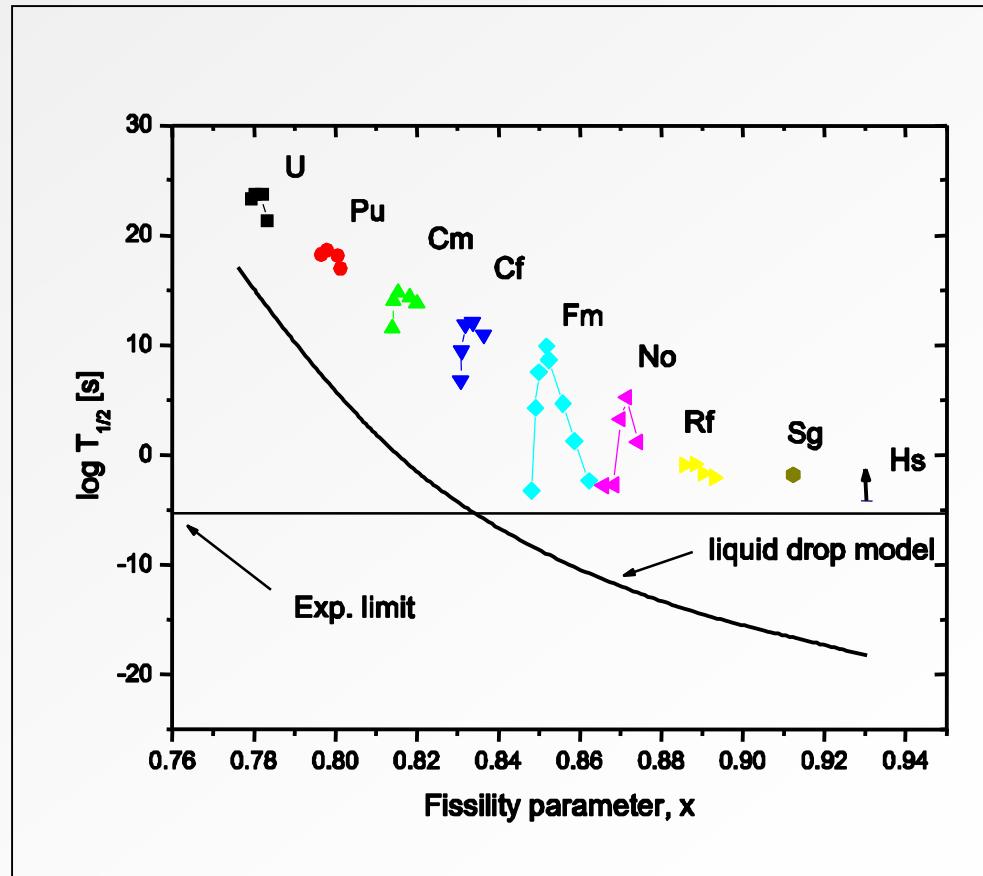
Pravdepodobnosť štiepenia

$$\left(\frac{Z^2}{A}\right)_{crit} = 50.883 \left(1 - 1.7826 \left[\frac{(A - 2Z)}{A}\right]^2\right)$$

Štiepiteľnosť
(fissility)

$$x \approx \frac{\left(\frac{Z^2}{A}\right)}{\left(\frac{Z^2}{A}\right)_{crit}}$$

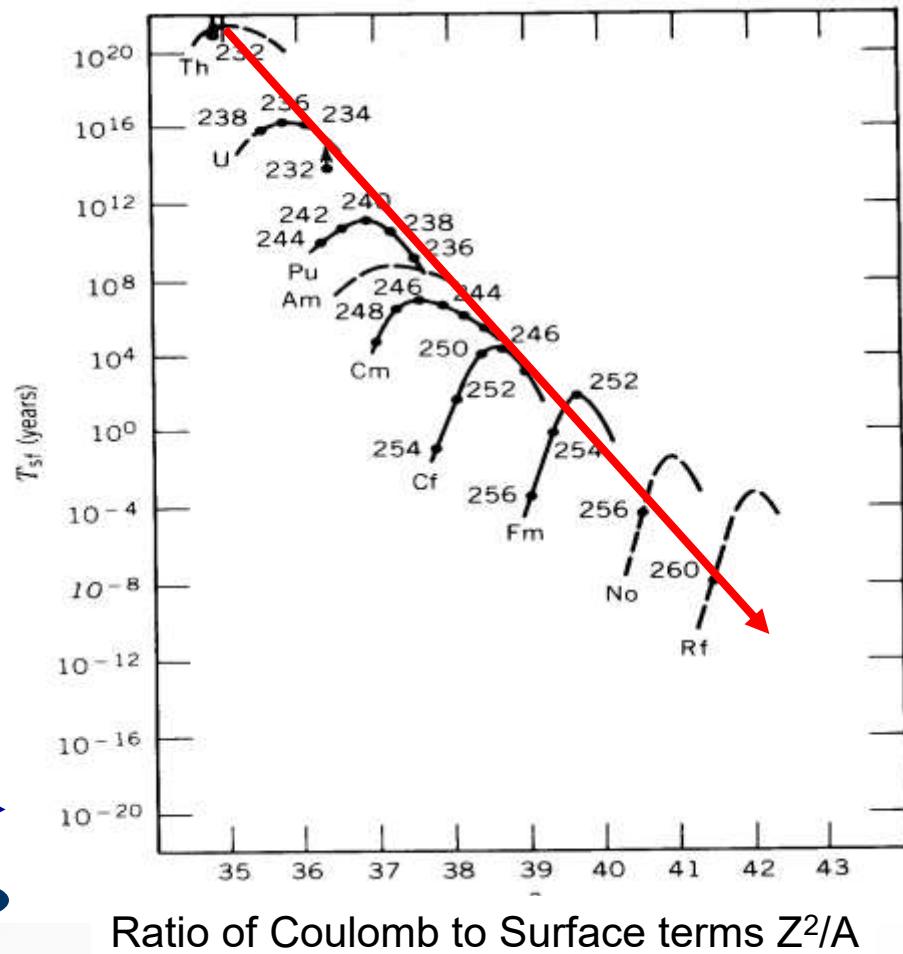
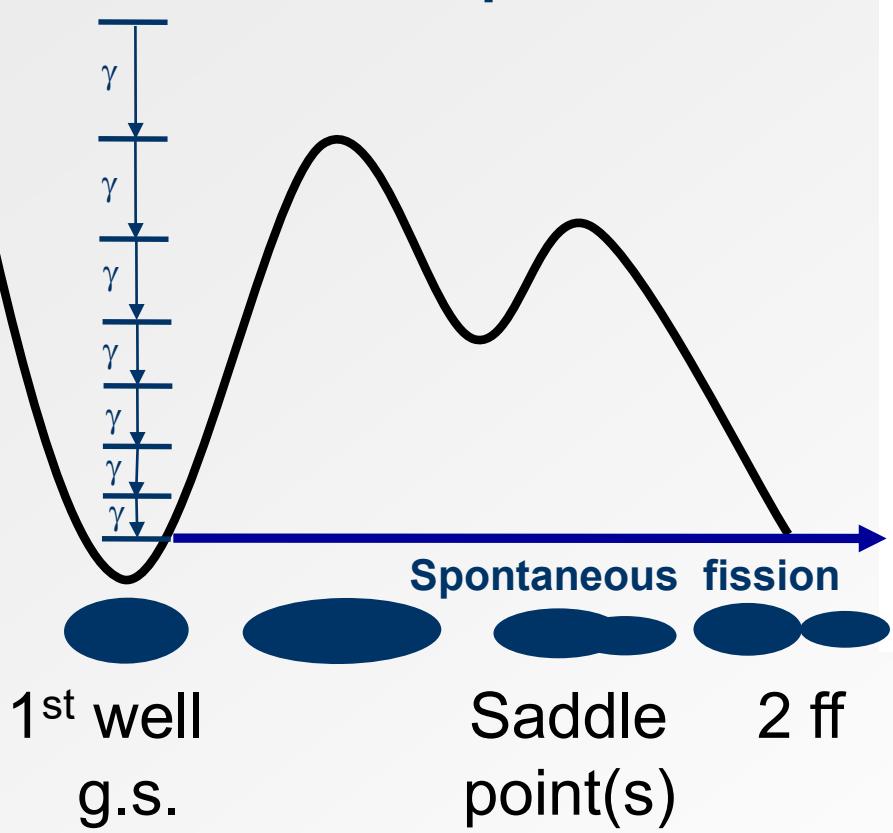
Pravdepodobnosť štiepenia je potlačená pre izotopy s nepárnym počtom protónov a/alebo neutrónov.
Nie je teda ibafunkciou Z^2/A



Spontánne štiepenie ($T_{1/2,\text{sf}} \sim 10^{-6} - 10^{25} \text{s}$)



- 1940 Spontaneous fission (^{238}U , G.N. Flerov and K.A. Petrzhak)
- Fission from the ground state
- Shell effects are important

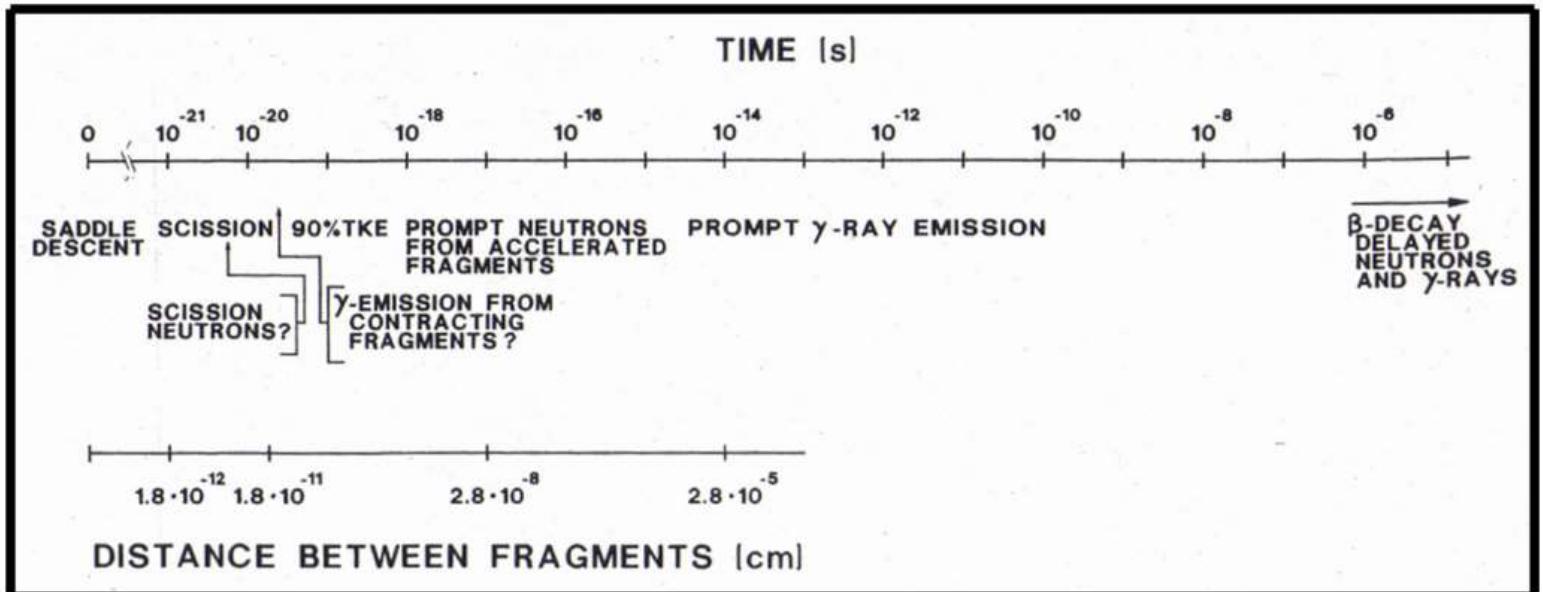


$$\Gamma_f = \frac{1}{2\pi\rho} \left\{ 1 + \exp\left[\frac{2\pi(B_f - E)}{\hbar\omega_f} \right] \right\}^{-1}$$

dynamika štiepenia



(a)



(b)

Figure 1.6: (a) Nuclear shapes in the fission process: ellipsoidal deformation, formation of the neck between the fragments and finally the rupture of the neck with two fission fragments as the result. (b) The fission process as a function of time [Wag91].



Spontánne štiepenie

Spontánne štiepenie prebieha zo základného stavu a potrebuje pri penetrácii prekonáť výrazne širšiu a vyššiu bariéru ako štiepenie zo vzbudených hladín. Preto má relatívne dlhé parciálne polčasy rozpadu.

Reálne sa sleduje iba pre izotopy prvkov tiažších ako tórium ($Z \geq 90$) s parciálnymi polčasmi rádovo 10^{20} rokov.

Pre tiažšie prvky však štiepna bariéra rýchlo klesá a polčas klesá rádovo na sekundy a menej napr. v prípade izotopov rutherfordia ($Z = 104$) je to typicky v rozsahy od 10 mikrosekúnd po 10tky sekúnd.

SOME HISTORICAL MILESTONES IN FISSION

<http://www.chem.elte.hu/Sandor.Nagy/loadable/6-104-00.Appendix1.htm>



1932 Discovery of neutron (J. Chadwick)

1937 Development of the Liquid Drop Model (N.Bohr)

1939 Neutron-induced fission (O. Hahn and F. Strassmann)
Explanation of fission (L. Meitner and O.R. Frisch)

1940 Spontaneous fission (^{238}U ,G.N. Flerov and K.A. Petrzhak)

1942 First self-sustaining chain reaction (E. Fermi)

1945 First nuclear bomb (The Manhattan project)

1946 Alpha accompanied (ternary) fission

1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)

1966 Delayed fission (V.I Kuznetzov et al.)

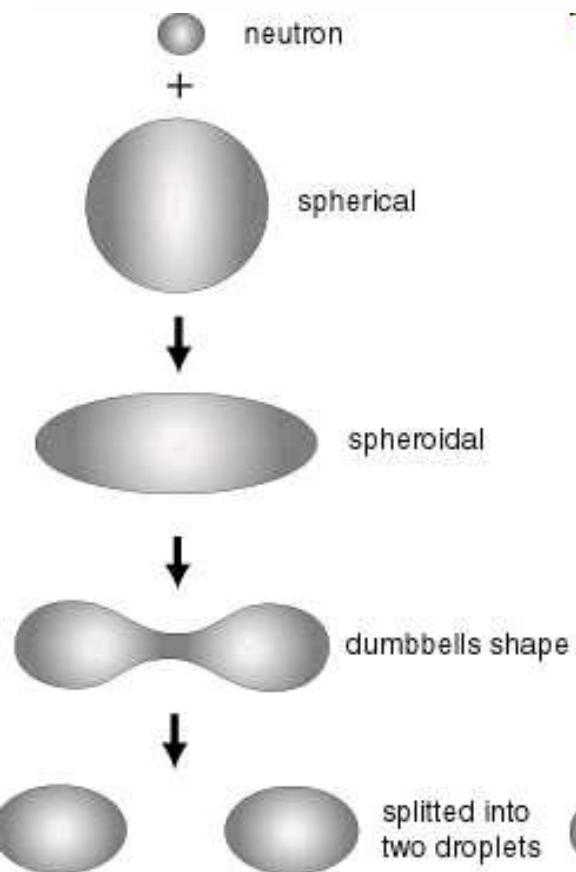
1967 Macroscopic-microscopic method (V. Strutinsky)

1984 Discovery of ^{14}C cluster decay (H.J. Rose and G.A.Jones)

~1994 Electromagnetic fission of radioactive ion beams (GSI)



Mechanizmus indukovaného štiepenia



1939 Neutrónovo idnukované štiepenie
- O. Hahn and F. Strassmann.

Vysvetlenie mechanizmu štiepenia poskytli L. Meitner and O.R. Frisch.

Pri štiepení jadier sa emitujú tzv. promptné neutróny, ktoré môžu sposobiť ďalšie štiepenie.

V procese štiepenia sa môžu emitovať aj tzv. oneskorené neutróny, nasledujúce po beta premene štiepnych fragmentov.

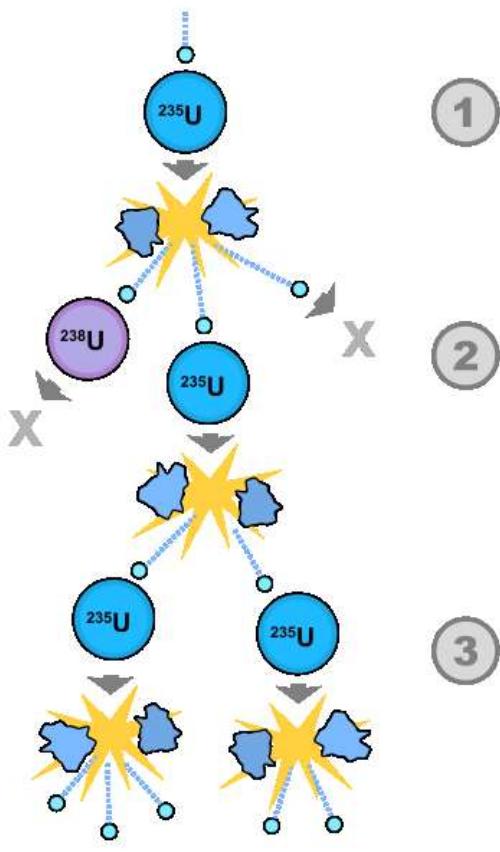
Indukované štiepenie

①

1942 Prvá reťazová reakcia (E. Fermi)

②

③





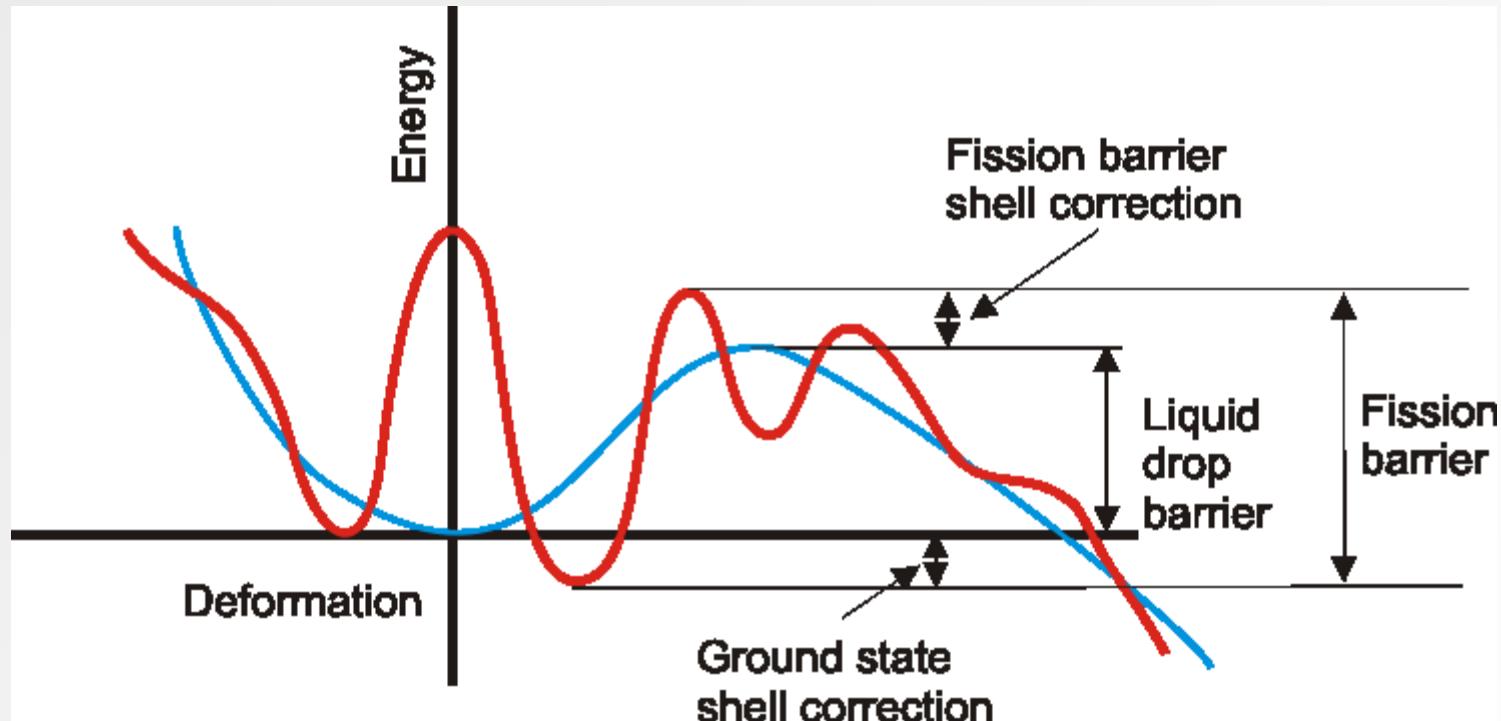
Spontánne štiepenie

Spontánne štiepenie prebieha zo základného stavu a potrebuje pri penetrácii prekonáť výrazne širšiu a vyššiu bariéru ako štiepenie zo vzbudených hladín. Preto má relatívne dlhé parciálne polčasy rozpadu.

Reálne sa sleduje iba pre izotopy prvkov tiažších ako tórium ($Z \geq 90$) s parciálnymi polčasmi rádovo 10^{20} rokov.

Pre tiažšie prvky však štiepna bariéra rýchlo klesá a polčas klesá rádovo na sekundy a menej napr. v prípade izotopov rutherfordia ($Z = 104$) je to typicky v rozsahy od 10 mikrosekúnd po 10tky sekúnd.

Štiepna bariéra vs. Kvapkový model



Ak by sa štiepna bariéra riadila iba kvapkovým modelom mala by iba jedno maximum. Reálna štiepna bariéra má komplexnejší priebeh.

Asymetrické štiepenie

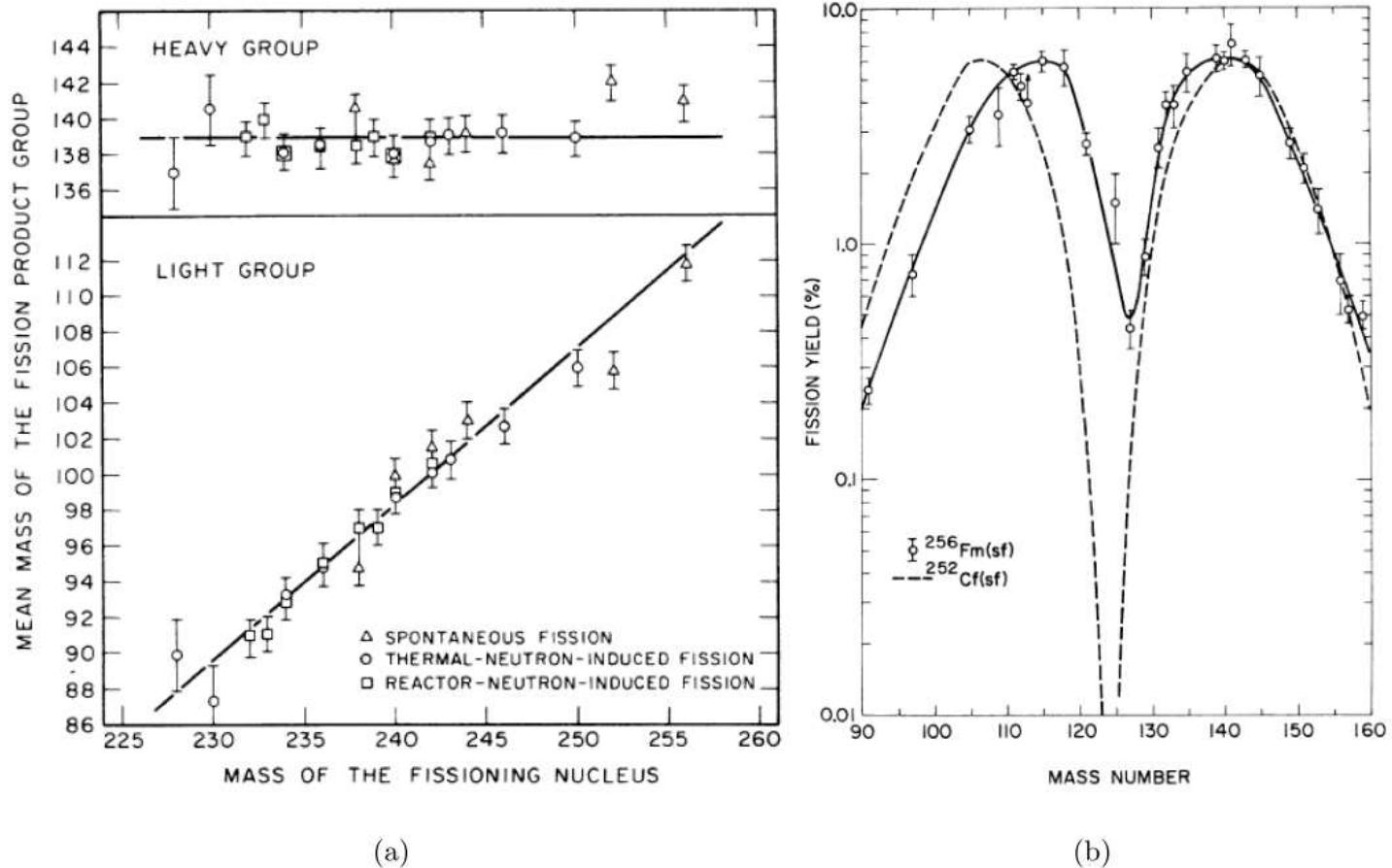
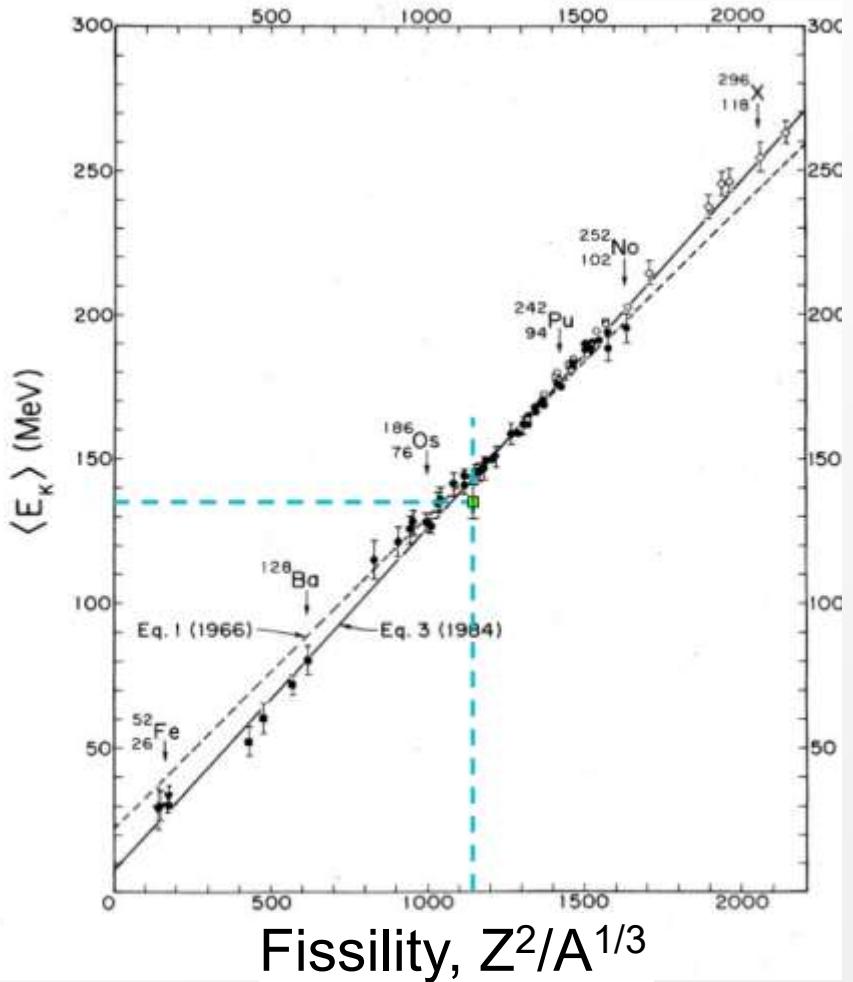


Figure 1.5: (a) Average masses of the heavy and light fragment groups as a function of the mass of the fissioning nucleus. (b) Example of the double-humped structure in the asymmetric spontaneous fission of ^{256}Fm and ^{252}Cf [Fly72].

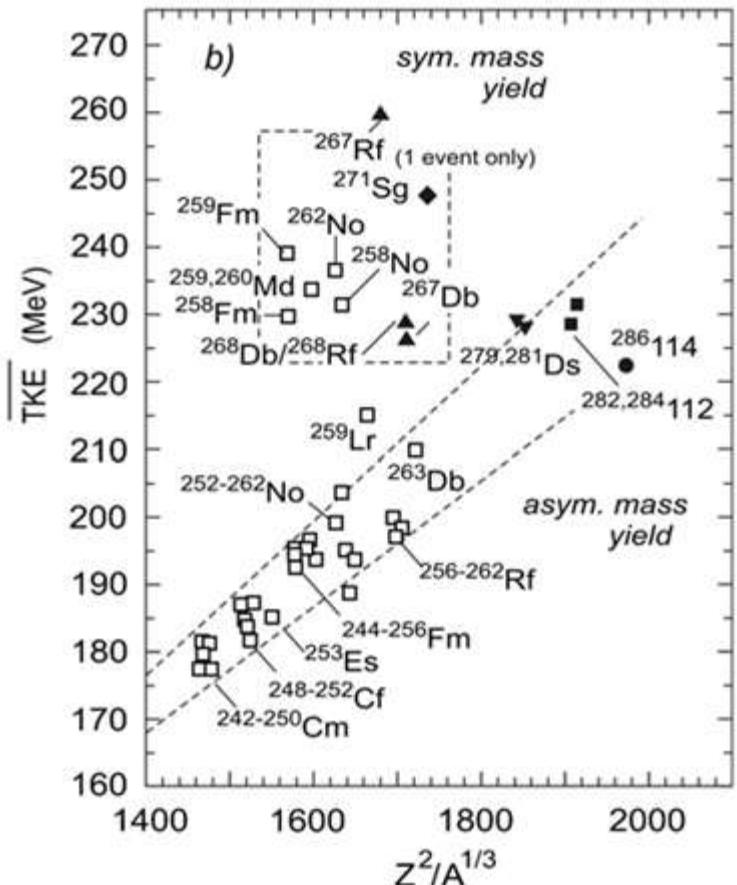


Viola Seaborg systematika



Celková kinetická energia fragmentov narastá so štiepitoľnosťou jadra.

TKE v oblasti transuránov



Viola-Seaborg pre transurány vykazuje naďalej podobný lineárny trend, ale objavuje sa niekoľko výnimiek.

Ide zväčša o izotopy, ktoré sa štiepia symetricky na dva fragmenty z oblasti dvojito magického jadra ^{132}Sn .

Symetria rozloženia hmoty vo fragmentoch, je jednou z podstatných vlastností spontánneho štiepenia jadier.

Yu. Oganessian, J. Phys. G. 34, R165 (2007)

SOME HISTORICAL MILESTONES IN FISSION

<http://www.chem.elte.hu/Sandor.Nagy/loadable/6-104-00.Appendix1.htm>



1932 Discovery of neutron (J. Chadwick)

1937 Development of the Liquid Drop Model (N.Bohr)

1939 Neutron-induced fission (O. Hahn and F. Strassmann)

Explanation of fission (L. Meitner and O.R. Frisch)

1940 Spontaneous fission (^{238}U ,G.N. Flerov and K.A. Petrzhak)

1942 First self-sustaining chain reaction (E. Fermi)

1945 First nuclear bomb (The Manhattan project)

1946 Alpha accompanied (ternary) fission

1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)

1966 Delayed fission (V.I Kuznetzov et al.)

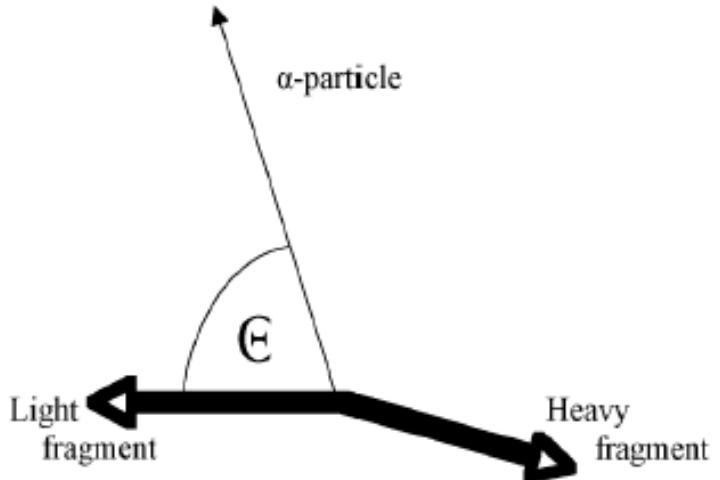
1967 Macroscopic-microscopic method (V. Strutinsky)

1984 Discovery of ^{14}C cluster decay (H.J. Rose and G.A.Jones)

~1994 Electromagnetic fission of radioactive ion beams (GSI)



Ternary fission



- Popri tvorbe dvoch fragmentov môže nastáť situácia že sa emituje ďalšia nabitá častica – zväčša veľmi ľahká (protón, deutérium, trícium alebo alfa častica).
- Cca 2% štiepení – relatívne zriedkavý proces.
- Trícium sa tvorí približne v 6 - 10% prípadov – hlavný zdroj trícia v ľahkovodných reaktoroch. Alfa častica takmer 90% prípadov.

SOME HISTORICAL MILESTONES IN FISSION

<http://www.chem.elte.hu/Sandor.Nagy/loadable/6-104-00.Appendix1.htm>



1932 Discovery of neutron (J. Chadwick)

1937 Development of the Liquid Drop Model (N.Bohr)

1939 Neutron-induced fission (O. Hahn and F. Strassmann)

Explanation of fission (L. Meitner and O.R. Frisch)

1940 Spontaneous fission (^{238}U ,G.N. Flerov and K.A. Petrzhak)

1942 First self-sustaining chain reaction (E. Fermi)

1945 First nuclear bomb (The Manhattan project)

1946 Alpha accompanied (ternary) fission

1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)

1966 Delayed fission (V.I Kuznetzov et al.)

1967 Macroscopic-microscopic method (V. Strutinsky)

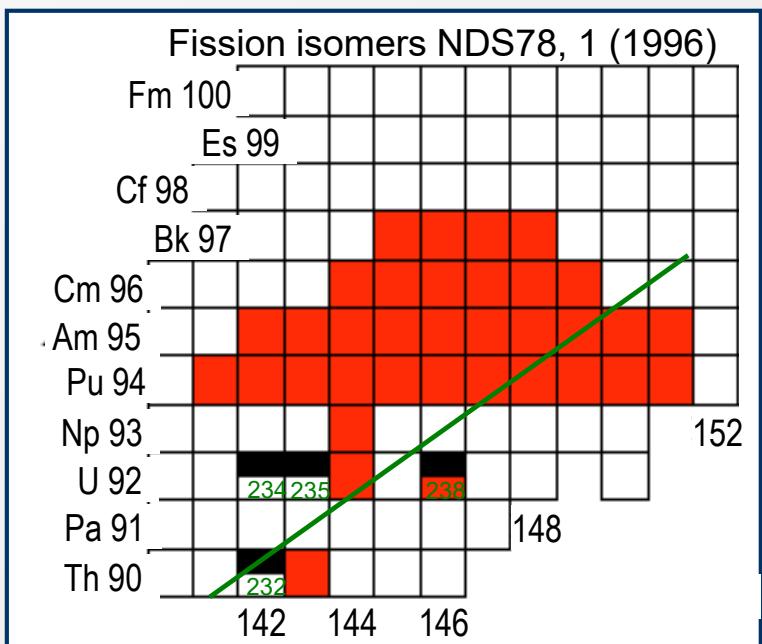
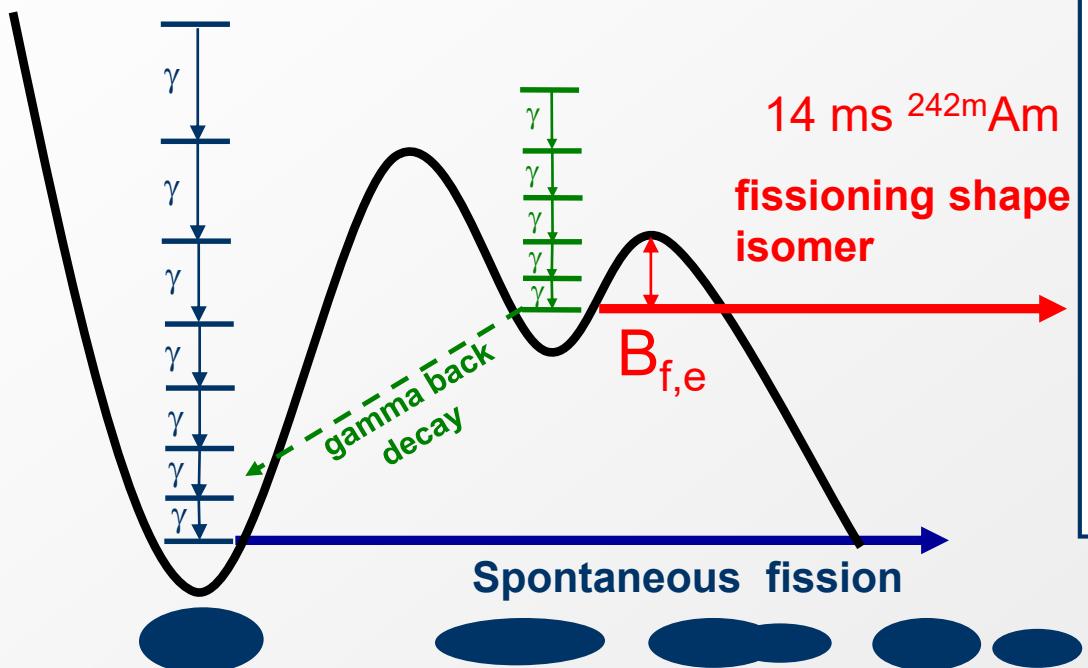
1984 Discovery of ^{14}C cluster decay (H.J. Rose and G.A.Jones)

~1994 Electromagnetic fission of radioactive ion beams (GSI)

Fissioning Shape Isomers ($T_{1/2,f} \sim \text{ns-ms}$)



- Discovery: 1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)
- **Populate states in the second well (typical $E^* = 2-3 \text{ MeV}$)**
- Lower and thinner $B_{\text{fis,external}}$ \Rightarrow shorter $T_{1/2}$
- e.g. ^{242}Am $T_{1/2} = 141 \text{ y}$, but ^{242m}Am $T_{1/2} = 14 \text{ ms}!$



SOME HISTORICAL MILESTONES IN FISSION

<http://www.chem.elte.hu/Sandor.Nagy/loadable/6-104-00.Appendix1.htm>



1932 Discovery of neutron (J. Chadwick)

1937 Development of the Liquid Drop Model (N.Bohr)

1939 Neutron-induced fission (O. Hahn and F. Strassmann)
Explanation of fission (L. Meitner and O.R. Frisch)

1940 Spontaneous fission (^{238}U ,G.N. Flerov and K.A. Petrzhak)

1942 First self-sustaining chain reaction (E. Fermi)

1945 First nuclear bomb (The Manhattan project)

1946 Alpha accompanied (ternary) fission

1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)

1966 Delayed fission (V.I Kuznetzov et al.)

1967 Macroscopic-microscopic method (V. Strutinsky)

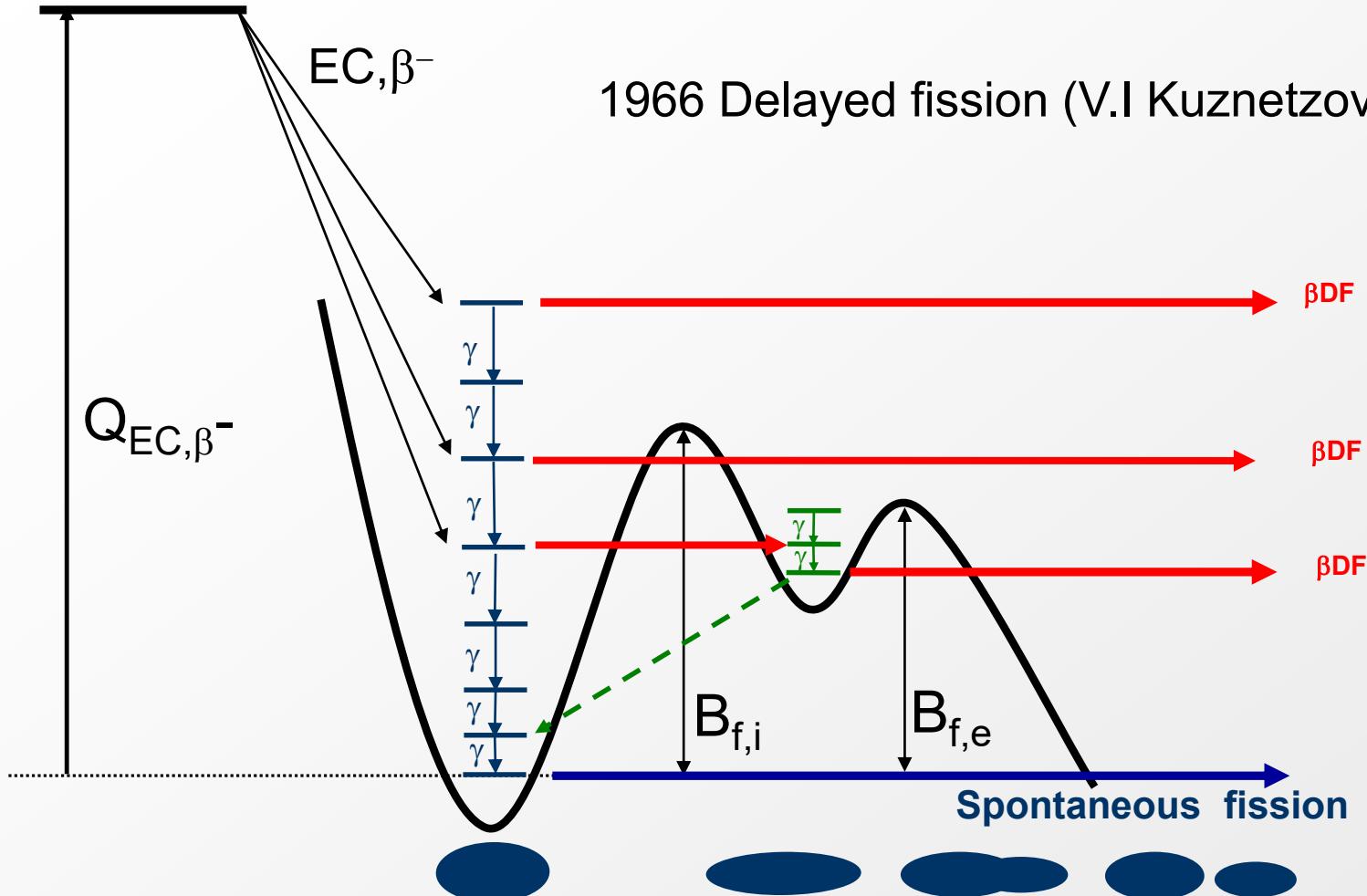
1984 Discovery of ^{14}C cluster decay (H.J. Rose and G.A.Jones)

~1994 Electromagnetic fission of radioactive ion beams (GSI)

Beta delayed fission (β DF, $T_{1/2,f} = T_{1/2,b}$)



1966 Delayed fission (V.I Kuznetzov et al.)



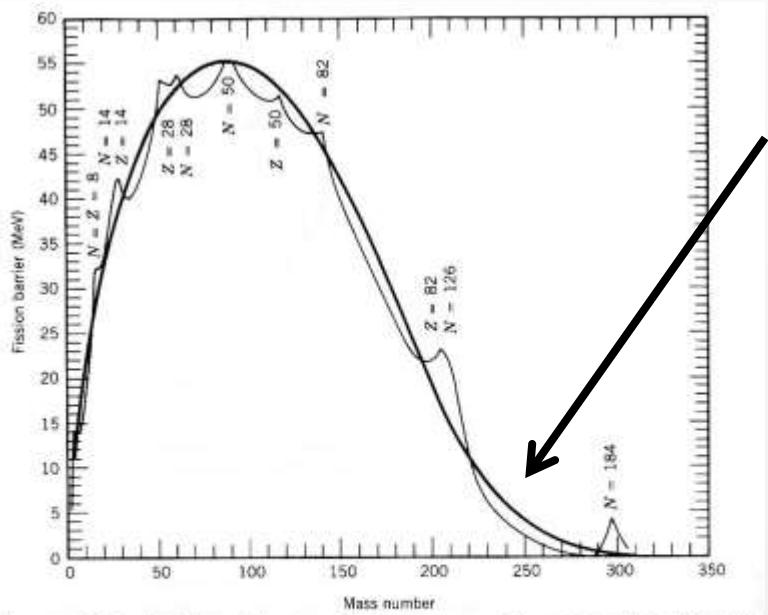
Štiepenie zo vzbudených hladín obsadzovaných
beta premenou materského jadra.



VYUŽITIE INDUKOVANÉHO ŠTIEPENIA

Indukované štiepenie

Po interakcii s neutrónom vznikne zložené jadro v excitovanom stave, napr. $n + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^*$. Ak je energia vzbudenia väčšia ako výška štiepnej bariéry, jadro sa štiepi.



Typická výška štiepnej bariéry v oblasti uránu je $\sim 5 - 10$ MeV.

Figure 13.3 Variation of fission activation energy with mass number. The dark curve is based on the liquid-drop model, calculated only for the most stable isotope at each mass number, and the light curve shows the effect of including shell structure. Note the typical 5-MeV energies around uranium, the vanishing energy around mass 280 (making these nuclei extremely unstable to spontaneous fission), and the stability around mass 300 from the expected neutron shell closure. From W. D. Myers and W. J. Swiatecki, *Nucl. Phys.* **81**, 1 (1966).



Emisia promptných neutrónov

Počet emitovaných neutrónov je charakteristický pre príslušný proces štiepenia a konkrétny izotop. Tento počet mierne narastá s energiou neutrónu vyvolajúceho štiepenie.

Pri štiepení sa zvyčajne emituje 2 – 4 promptných neutrónov

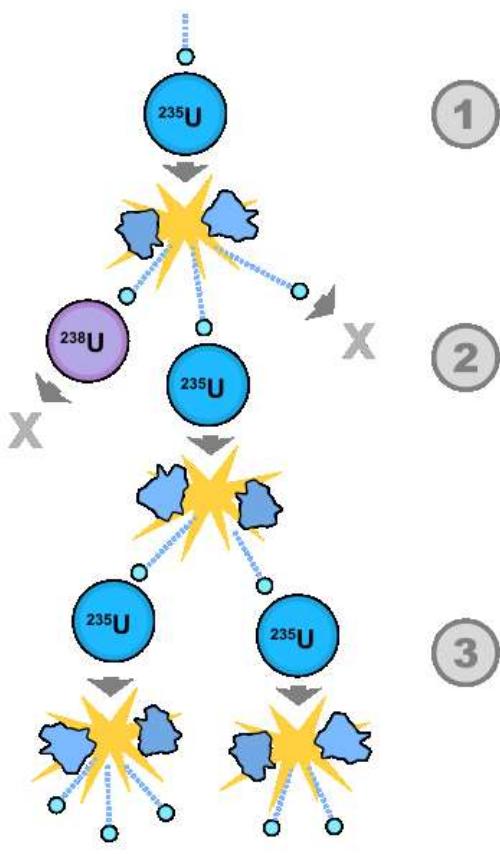
^{233}U ... 2.6 neutrónov

^{235}U ... 2.5 neutrónov

^{238}Pu ... 2.3 neutrónov

^{252}Cf ... 3.8 neutrónov

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U



Pri interakcii neutrónu so zanedbateľnou kinetickou energiou je excitačná energia ^{235}U o takmer 2 MeV vyššia ako v prípade ^{238}U .

Dôvodom je párovanie nukleónov (^{235}U je má nepárny počet neutrónov a jadro po absorbcii neutrónu získa párovaciu energiu (viď párovací člen vo Weiszackerovej formuli)).

V prípade ^{235}U excitačná energia postačuje na prekonanie štiepnej bariéry, preto je možné štiepenie tepelnými neutrónmi. Izotop ^{238}U potrebuje dodatočnú – tzv. aktivačnú – energiu.

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U



Pri interakcii neutrónu so nulovou kinetickou energiou je excitačná energia ^{235}U o ~ 2 MeV vyššia ako v prípade ^{238}U .

Dôvodom je párovanie nukleónov (^{235}U je má nepárny počet neutrónov a jadro po absorbcii neutrónu získa párovaciu energiu (vid' párovací člen vo Weiszackerovej formuli)).

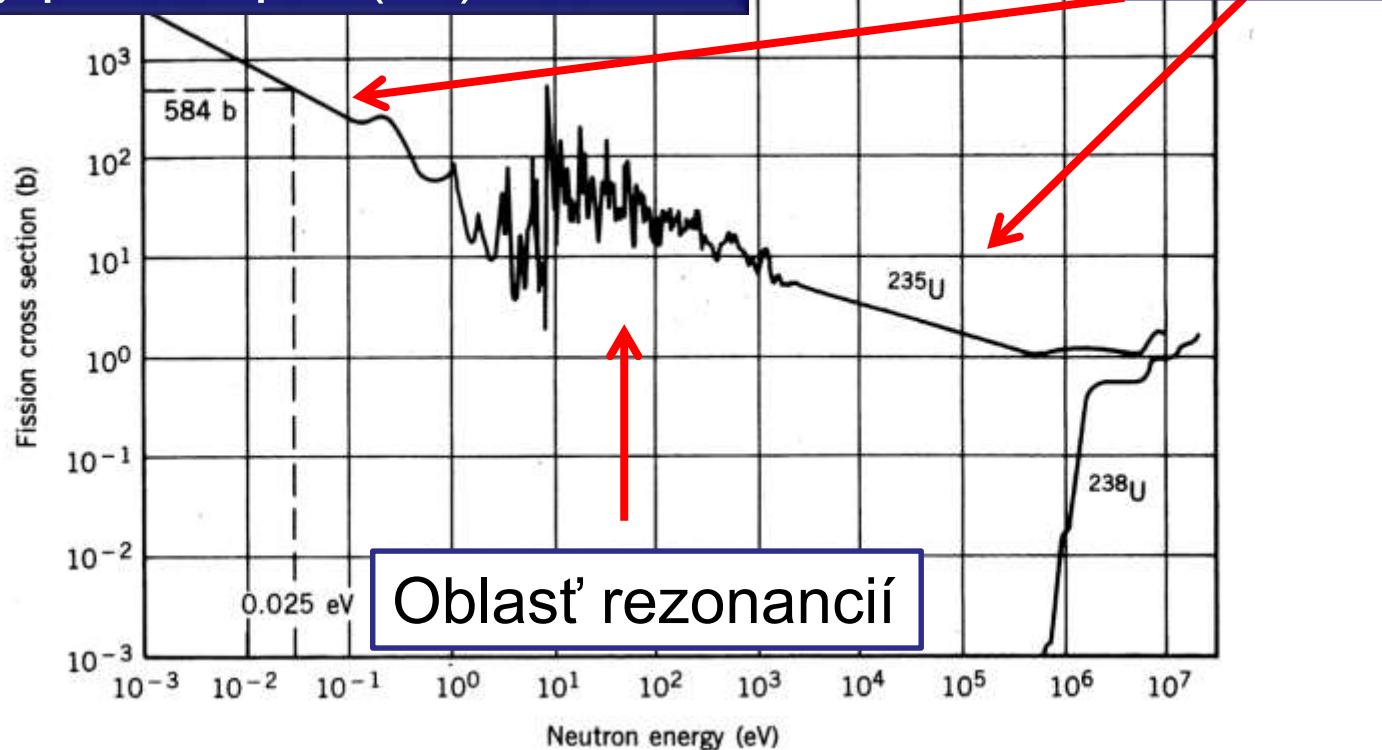
V prípade ^{235}U excitačná energia postačuje na prekonanie štiepnej bariéry, preto je možné štiepenie tepelnými neutrónmi. Izotop ^{238}U potrebuje dodatočnú – tzv. aktivačnú – energiu.

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U



Účinný prierez pre (n,f) reakcie.

Závislosť 1/v



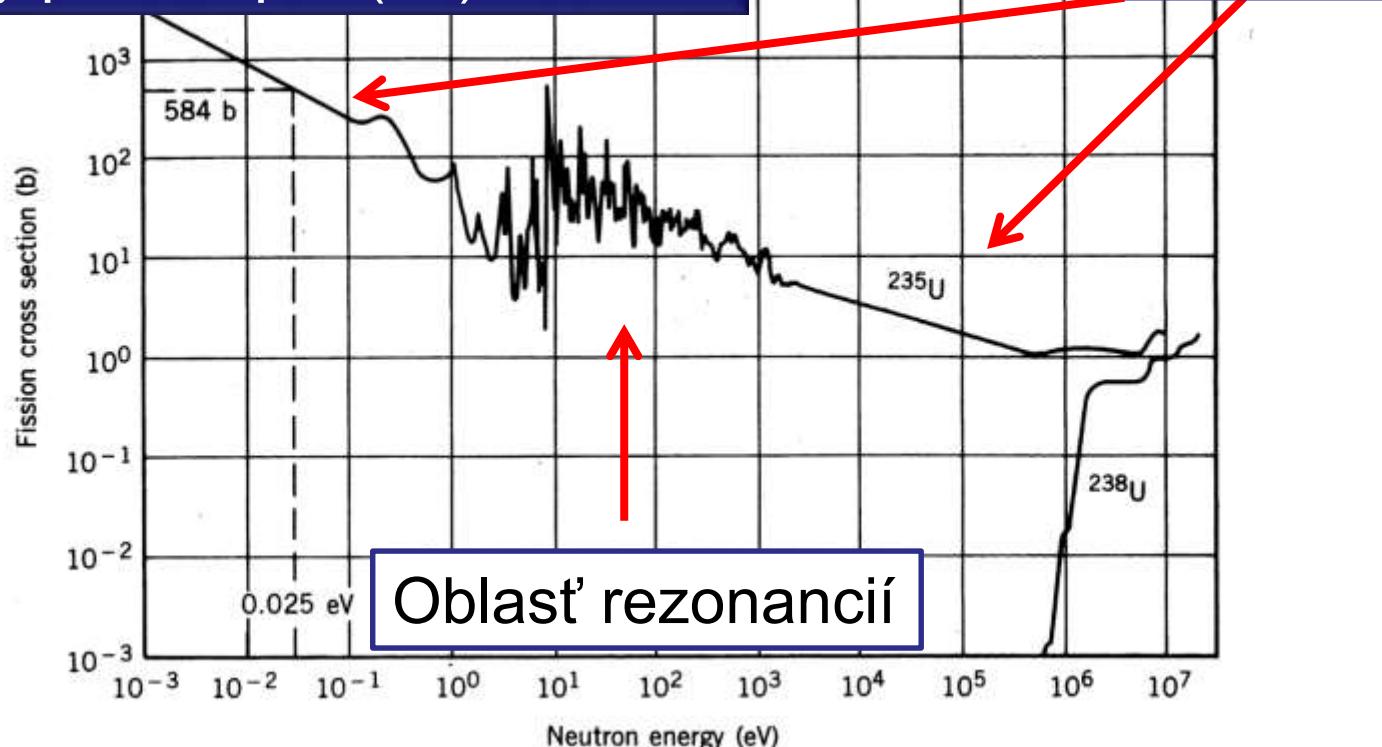
Účinný prierez prudko narastá s klesajúcou energiou neutrónu. Preto je výhodné využiť na štiepenie pomalé neutróny. V oblasti epithermálnych neutrónov (1 – 10 eV) sa objavujú výrazné rezonancie.

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U



Účinný prierez pre (n,f) reakcie.

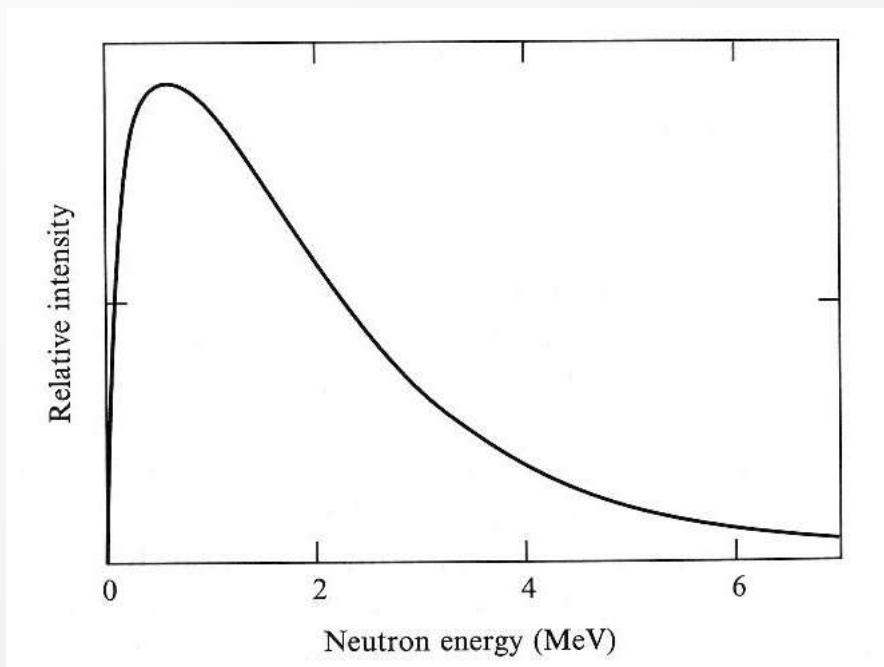
Závislosť 1/v



Časť neutrónov v zmesi $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ sa zachytáva na ^{238}U a nespôsobuje štiepenie. Ide o tzv. (n,γ) reakcie, pri ktorých sa po absorbcii neutrónu emituje γ žiarenie. Preto je vhodné obohacovať palivo aby malo vyšší podiel ^{235}U .

Energia neutrónov

Energia neutrónov je v priemere cca 2 MeV – považujú sa preto za rýchle neutróny. To je kritický faktor pri konštrukcii reaktora. Vo všeobecnosti je možné zvoliť design reaktora pre rýchle aj pomalé neutróny, ale je potrebné tomu prispôsobiť konštrukciu reaktora a najmä vhodne zvoliť štiepny materiál.





Energetická bilancia štiepenia

Väčšina energie sa pri štiepení uvoľnuje v podobe kinetickej energie fragmentov.

- V prípade ^{235}U je rozdelenie energie približne nasledujúce:
Kinetická energia fragmentov ~165 MeV
 - Promptné neutróny (v priemere 2.5 neutrónu s priemernou energiou 2 MeV) ~ 5 MeV
 - Promptné γ kvantá ~ 8 MeV
 - β premena rádioaktívnych fragmentov (približne 30 – 40% elektróny, zvyšok neutrína) ~ 19 MeV
 - γ kvantá z fragmentov ~ 7 MeV.
- ←
Oneskorene
uvolnená
energia



THE END